УДК 537.533

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ ТЕПЛООТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

В.Г. Дыскин

НПО «Физика – Солнце» АН Республики Узбекистан. Физико-технический институт,г. Ташкент
E-mail: dyskin@uzsci.net

Приведены результаты компьютерной оптимизации визуального коэффициента пропускания T_V теплоотражающих покрытий SnO_2-Ag-SnO_2 и TiO_2-Ag-TiO_2 с защитными слоями. Установлено, что для выполнения условия $T_v \geq 80$ % толщина защитных слоев серебра для SnO_2-Ag-SnO_2 не должна превышать 1,5 нм, а для TiO_2-Ag-TiO_2 – 2 нм. Показано, что теплоотражающие покрытия с одним защитным слоем имеют лучшие оптические характеристики по сравнению с теплоотражающими покрытиями с двумя защитными слоями.

В результате нефтяных кризисов и постоянного роста цен на топливо актуальной задачей становится не только освоение и развитие энергетики на основе альтернативных, например возобновляемых источников энергии, но и внедрение энергосберегающих технологий в строительство жилых, административных и промышленных зданий. Применение в строительстве энергосберегающего остекления уменьшает потребление энергии зимой на обогрев зданий, летом на их охлаждение. Основным элементом конструкций энергосберегающего остекления являются или теплопоглощающие, или нейтрально-окрашенные, или теплоотражающие стекла [1–4].

Теплоотражающее стекло – это листовое стекло, на которое нанесено теплоотражающее покрытие (ТОП), представляющее собой селективное диэлектрик-металл-диэлектрик покрытие. Применение трехслойной структуры ТОП обусловлено тем, что для увеличения адгезии металла со стеклом наносят промежуточный слой, а для уменьшения коэффициента отражения металла и защиты его от воздействия окружающей среды наносят просветляющий слой. В качестве металлического слоя используются тонкие пленки из Cr, Ni, Ag, Cu, Au, Al, но основным металлом ТОП является серебро, которое сильно отражает солнечное излучение в инфракрасной области спектра и имеет маленькую степень поляризации даже при больших углах падения излучения [5, 6].

В промышленных масштабах нанесение ТОП на плоское строительное стекло осуществляется на магнетронных распылительных установках. Для защиты слоя серебра от воздействия кислородной плазмы при магнетронном способе нанесения покрытий применяют защитные (барьерные) слои [1–4]. Так как металлы, полупроводники, окислы и т. д. образуют сплошные пленки при разных толщинах, то исследование влияния структуры, материала и толщины барьерных слоев на оптические характеристики ТОП представляет практический интерес.

Цель данной работы – методом компьютерного моделирования исследовать влияние структуры, материала и толщины слоев на оптические характеристики теплоотражающих покрытий, определить оптимальные толщины защитных слоев. В качестве объекта исследования были выбраны ТОП SnO_2-Ag-SnO_2 (SAS) и TiO_2-Ag-TiO_2 (TAT).

В качестве критерия оптимизации ТОП выбран визуальный коэффициент пропускания T_v, который определяется по формуле

$$T_v = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)V(\lambda)T(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)V(\lambda)d\lambda}, \qquad (*)$$

где $V(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность человеческого глаза [7], $T(\lambda)$ – коэффициент пропускания системы ТОП – стекло, λ_1 и λ_2 границы видимой области спектра, спектра, $E(\lambda)$ – стандартный спектр прямого потока солнечного излучения АМ1.5 [8]. Спектр нормирован на максимальное значение.

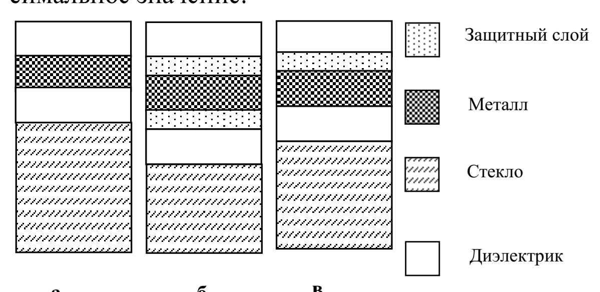


Рис. 1. *Структура ТОП без защитных слоев (а), с двумя защитными слоями (б), с одним защитным слоем (в). Нумерация слоев сверху вниз*

Под оптимизацией в данной работе подразумевается поиск структур, материалов и толщин слоев ТОП, для которых T_v имеют наибольшие значения. Материалы, толщины слоев и структуры ТОП, реализующие наибольшие значения T_v, далее именуем оптимальными.

Компьютерные методы проектирования оптических покрытий основаны на использовании математических методов многопараметрической оптимизации [9–11]. Известно, что результаты оптимизации зависят от выбора начальных значений оптимизируемых параметров, поэтому в настоящей работе поиск наибольшего значения (*) осуществлялся методом перебора толщин слоев. Шаг изменения толщины выбирался не меньше, чем точность, с которой можно наносить слои, а интер-

вал изменения толщины слоев выбирался так, чтобы он включал в себя все значения, которые имеют место на практике

$$d_i \in [0,75 d_{\min}, 1,25 d_{\max}],$$
$$d_{\min} = \min(\gamma_1, \gamma_2),$$
$$d_{\max} = \max(\gamma_1, \gamma_2),$$

где d_i – толщина i-го слоя покрытия, γ_1=0,25λ_1/n_1, γ_2=0.25λ_2/n_2, n_1, n_2 – показатели преломления i-го слоя для λ_1=0,40 мкм λ_2=0,75 мкм. Толщина слоя серебра 12 нм, соответствующая сплошной пленке, при моделировании оставалась постоянной. Описание математической модели многослойной тонкопленочной системы и рекуррентные формулы для вычисления коэффициентов отражения, пропускания, поглощения приведены в [9]. Показатель преломления стекла принят равным 1,5. Интеграл рассчитывался численно, Оптические постоянные материалов слоев заимствованы из [10—14].

Была выполнена оптимизация толщин слоев SAS и TAT без защитных слоев (рис. 1, *а*). Расчеты показали (рис. 2), что для оптимальных толщин коэффициенты пропускания в инфракрасной области спектра практически не отличаются друг от друга, а в коротковолновой области спектра TAT имеет лучшие по сравнению с SAS оптические характеристики. Визуальный коэффициент пропускания обоих покрытий равен 97,0 %.

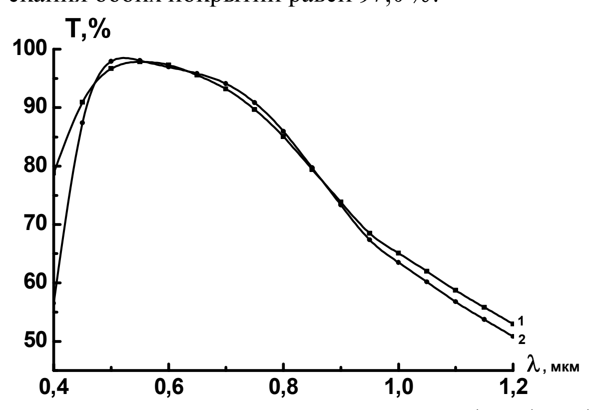
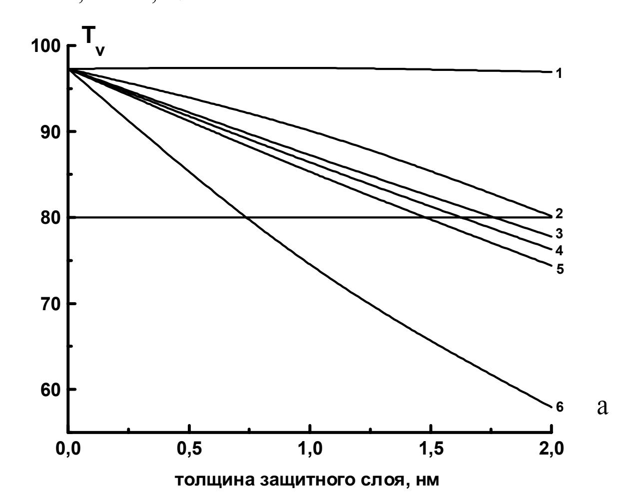


Рис. 2. *Спектральный коэффициент пропускания: 1) SnO_2(44 нм)-Ag-SnO_2(55 нм) и 2) TiO_2(39 нм)-Ag-TiO_2(47 нм)*

На рис. 3 приведены результаты расчетов зависимости T_v от толщины защитного слоя для разных материалов. Требования к материалу защитного слоя очевидны: минимальное уменьшение T_v, стойкость к воздействию агрессивной кислородной среды, способность образовывать на поверхности слоев сплошные пленки малой толщины. Моделирование показало, что для ТОП с барьерными слоями (рис. 1, *б*) оптимальной является симметричная структура, т. е. структура с равными толщинами защитных слоев. Предельную толщину и оптимальный материал защитного слоя можно определить, используя условие $T_v \geq T_{v,\min}$, где $T_{v,\min}$ – задаваемое минимальное значение T_v. Например, если $T_{v,\min}$=80 % (на рис. 3 – линия, параллельная оси абсцисс), то:

- максимальная толщина защитных слоев для SAS – 1,5 нм, для TAT – 2 нм;
- использование хрома в качестве защитного слоя нецелесообразно;
- использование Ti в качестве защитного слоя вместо $Ni_{85}Cr_{15}$ уменьшает продолжи-тельность рабочего цикла напыления (не нужно тренировать мишени из сплава Ni-Cr в плазме магнетронного разряда);
- барьерные слои толщиной 1,5 нм и 2 нм из Al, Ti, $Ni_{85}Cr_{15}$, Ni уменьшают визуальный коэффициент пропускания SAS на 10 и 20 %, а TAT на 8,0 и 17,0 %.



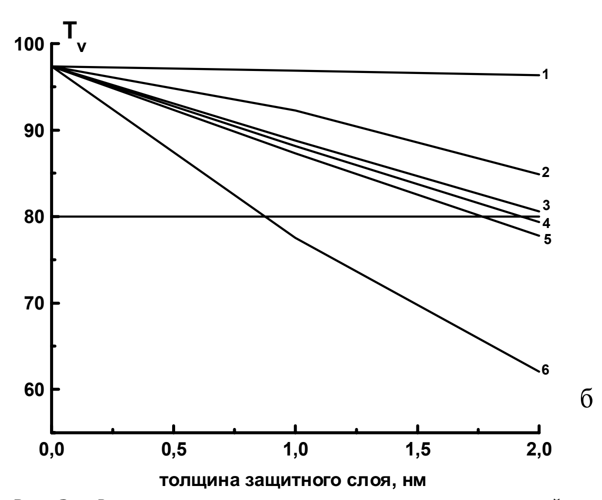


Рис. 3. *Влияние толщины защитных слоев на визуальный коэффициент пропускания TiO_2-Ag-TiO_2 (а) и SnO_2-Ag-SnO_2 (б). Для разных материалов: 1) Si, 2) Al, 3) Ti, 4) $Ni_{85}Cr_{15}$, 5) Ni, 6) Cr*

Для улучшения оптических характеристик ТОП в [4] предлагается использовать один защитный слой (рис. 1, *в*). С целью сравнения оптических характеристик для тех же материалов была выполнена оптимизация визуального коэффициента пропускания ТОП с одним защитным слоем. Результаты оптимизации приведены в таблице.

Сравнение значений T_v и рис. 4 указывают на преимущество ТОП с одним защитным слоем по

сравнению с двумя. Очевидно, что применение одного защитного слоя возможно, если серебро не диффундирует в диэлектрический и защитный слои.

Таблица. *Результаты расчётов T_v для ТОП с одним (значение сверху) и двумя (значение снизу) защитными слоями*

Барьерный слой	SnO_2-Ag-SnO_2		TiO_2-Ag-TiO_2	
	1 нм	2 нм	1 нм	2 нм
Al	94,1	89,9	94,9	92,1
	90,0	80,1	92,3	84,9
Ti	92,0	86,6	92,7	88,2
	87,2	77,8	88,9	80,6
$Ni_{85}Cr_{15}$	91,5	85,8	92,3	87,5
	86,4	76,3	88,1	79,4
Ni	91,0	84,8	91,6	86,7
	85,4	74,4	87,3	77,8

Следует отметить, что применение SnO_2 в производстве ТОП обусловлено тем, что ее коэффициент распыления (соответственно и скорость осаждения) в несколько раз выше, чем у TiO_2 [14]. Наш взгляд, модификация конструкции магнетронных распылительных установок с целью повышения коэффициента распыления материалов мишени, будет способствовать внедрению в производство ТОП на основе TiO_2 [15].

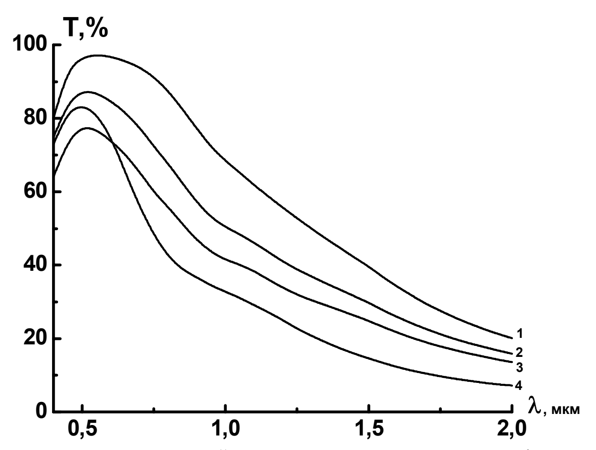


Рис. 4. *Спектральный коэффициент пропускания TiO_2-Ag-TiO_2 (1, 3) и SnO_2-Ag-SnO_2 (2, 4) с одним (1, 2) и двумя (3, 4) защитными слоями $Ni_{85}Cr_{15}$*

Автор благодарит доктора физ.-мат. наук, профессора В.П. Кривобокова за обсуждение работы и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слепцов В.В., Спиваков Д.Д., Александров А.Ю. Теплосберегающие стекла и энергосбережение // Теплоэнергетика. – 1999. – № 4. – С. 45–47.
2. Минько Н.И., Михальчук И.Н., Липко М.Ю. Модифицирование поверхности листового стекла // Стекло и керамика. – 2000. – № 4. – С. 3–7.
3. Martin-Palma R.J., Vázquez L., Martinez-Duart J.M., Malats-Riera. Silver-based low-emissivity coatings for architectural windows: Optical and structural properties // Solar Energy Materials and Collar Cells. – 1998. – № 5. – P. 55–66.
4. Баинов Д.Д., Кривобоков В.П., Легостаев В.Н. Оптимизация просветления теплоотражающих покрытий // Гелиотехника. – 2004. – № 3. – С. 85–91.
5. Розенберг Г.В. Современное состояние теории оптических свойств полупрозрачных металлических покрытий // Успехи физических наук. – 1956. – Т. 58. – № 3. – С. 487–518.
6. Введенский В.Д., Пинская Р.Я., Фурман Ш.А., Шестакова Т.В. Широкополосные отражатели на основе пленок серебра // Оптико-механическая промышленность. – 1983. – № 12. – С. 48.
7. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. – М: Наука. 1979. – 368 с.
8. Колтун М.М. Солнечные элементы. – М: Наука. 1987. – 192 с.
9. Яковлев П.Г., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. – М.: Машиностроение. 1987. – 186 с.
10. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
11. Гуснин С.Ю., Омельянов Г.А., Резников Г.А., Сироткин В.С. Минимизация в инженерных расчетах на ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1981. – 121 с.
12. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. – Л.: Химия, 1984. – 215 с.
13. Сасовская И.И, Носков М.М. Оптические свойства никеля // Физика металлов и металловедение. – 1971. – Т. 32. – № 4. – С. 723–727.
14. Горбань Н.Я., Стащук В.С., Шишловский А.А. Особенности поглощения света в сплавах Ni-Cr // Журнал прикладной спектроскопии. – 1974. – Т. 20. – № 5. – С. 881–885.
15. Плешивцев Н.В. Физические проблемы катодного распыления. – М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1979. – 80 с.
16. Жуков В.В., Кривобоков В.П., Янин С.Н. Распыление мишени магнетронного диода в присутствии внешнего ионного пучка // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – № 4. – С. 61–67.

Поступила 15.09.2006 г.